

ANALIZA ZŁOŻONOŚCI KONSTRUKCJI WYROBU Z UWZGLĘDNIENIEM ZASAD DfA

Product complexity analysis including DfA principles

Michał SAŚIADEK, Roman KIELEC

Streszczenie: Projektowanie inżynierskie jest złożonym ciągiem działań zamierzonym na opracowanie efektywnej konstrukcji wyrobu. Konstrukcja projektowanego wyrobu powinna być dostosowana do wymagań klienta i wymogów związanych z jego cyklem życia. W kontekście tych wymogów opracowano wiele zindywidualizowanych podejść projektowania dla X, gdzie X określa różne wymogi. Jednym z istotniejszych jest projektowanie dla montażu. W literaturze opracowano wiele ujęć tej metodologii projektowania, przy czym znaczna większość z nich ukierunkowana jest na analizę i zwiększenie efektywności procesu łączenia części składowych opracowywanego wyrobu.

W artykule zaproponowano nowe podejście do analizy złożoności projektowanego wyrobu z uwzględnieniem zasad projektowania dla montażu. Założenia polega ono na analizie poszczególnych węzłów konstrukcyjnych, definiowanych jako pary części, pod kątem możliwości dostosowania ich do łatwego, taniego i szybkiego procesu montażu. W kontekście tego opracowano macierzowy zapis struktury konstrukcyjnej wyrobu oraz zasady przydzielania określonych reguł „projektowania dla montażu” do odpowiednich węzłów konstrukcyjnych. Na przykładzie palnika gazowego przedstawiono praktyczne zastosowanie analizy złożoności oraz omówiono korzyści wynikające z jej wykorzystania.

Słowa kluczowe: analiza złożoności, projektowanie dla montażu, uproszczenie wyrobu

Abstract: Engineering design is a sequence of complex actions intended to develop an effective product structure. The designed product should be adapted to both the customer's requirements and the requirements related to its life cycle. In the context of these requirements, many individualised approaches of design for X have been developed, where X defines different requirements. One of the most important approaches in this field is design for assembly. There are many views of this designing methodology specified in literature, majority of which is aimed at analysis and increase of effectiveness of joining the integral parts of the designed product. The article proposes a new approach to the analysis of the designed product complexity, taking into account the principles of design for assembly. It is based on the analysis of construction nodes, defined as pairs of parts in terms of the possibility of adapting them to an easy, cheap and fast assembly process. In this context, a dependency matrix of the product structure was developed and the rules assigning specific principles of "design for assembly" to the relevant construction nodes. On the example of a gas burner, the practical application of complexity analysis is presented and the benefits of its application are discussed.

Keywords: complexity analysis, design for assembly, product simplification

Wprowadzenie

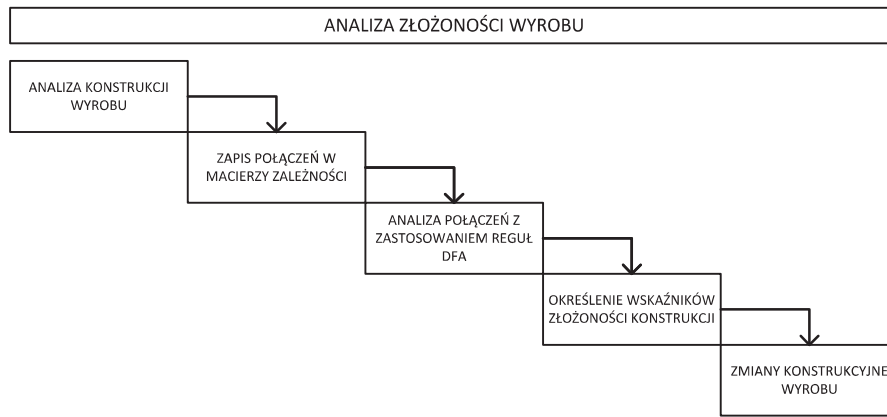
Projektowanie inżynierskie jest złożonym działaniem, zmierzającym do opracowywania efektywnej konstrukcji wyrobu. Na tym etapie należy uwzględnić wszystkie istotne wymagania cyklu życia produktu. Należą do nich m.in.: wytwarzanie, montaż, eksploatacja, wycofanie produktu z rynku i inne [5]. Jednym z istotniejszych wymogów jest montaż i w nurcie projektowania współbieżnego opracowano metodologię projektowania dla montażu DfA (z ang. Design for Assembly). Projektowanie dla montażu zorientowane jest na uwzględnienie wielu istotnych aspektów procesu montażu we wczesnej fazie projektowania inżynierskiego [1, 3, 9]. Metodologia ta jest skutecznie stosowana w wielu przedsiębiorstwach produkcyjnych, zwłaszcza tam, gdzie istnieje dział projektowania (lub dział rozwoju produktu) [2].

Opracowano wiele podejść tej metodologii, przy czym część z nich bazuje na wyznaczeniu odpowiednich wskaźników DfA, obrazujących dostosowanie analizowanej konstrukcji do wymogów efektywnego procesu montażu [1, 8, 9]. Innym podejściem jest opracowanie [3] zakładające analizę konstrukcji

projektowanego wyrobu, celem wyznaczenia wskaźnika czasu jego montażu, z uwzględnieniem czasów realizacji poszczególnych operacji montażu jego kolejnych części składowych. Ponadto w literaturze spotkać można wiele ujęć, w których opracowano zasady projektowania dla montażu w postaci wytycznych projektowych [1, 4, 8, 9]. W kontekście tych opracowań w niniejszym artykule zaproponowano analizę złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu, zorientowaną na dostosowanie jego konstrukcji do efektywnego – łatwego i taniego procesu montażu.

Opis i charakterystyka analizy złożoności

Analiza złożoności wyrobu przeznaczona jest do wykorzystania w etapie projektowania koncepcyjnego, kiedy powstają różne warianty projektowanego wyrobu. Służyć ma do wyznaczenia stopnia skomplikowania wyrobu ze względu na montaż jego części składowych i stanowić narzędzie doradcze do uproszczenia konstrukcji (dostosowania jej do efektywnego procesu montażu). Ponadto ma wspomagać projektanta w selekcji i wyborze odpowiednich reguł DfA i przyporządkowaniu ich do



Rys. 1. Etapy analizy złożoności
Fig. 1. Block diagram of product complexity analysis

Odpowiedzi (Y-tak/N-nie) na Pytanie (Q)	R_1 Integracja części	R_2 Poka-Yoke	R_3 Samopozycjonowanie części	R_4 Kierunek procesu montażu	R_5 Poprawny kształt części	R_6 Symetryczność części	R_7 Wizualny dostęp	R_8 Standaryzacja
R1_Q1="N" i R1_Q2="N" i R1_Q3="N" Q1 – Czy części A i B muszą wykonywać ruch względem siebie? Q2 – Czy części A i B muszą być wykonane z tego samego materiału? Q3 – Czy części A i B muszą być od siebie odseparowane/izolowane?	X							
R2_Q1="N" Q1 – Czy część B zabezpieczona jest przed niepoprawnym montażem?		X						
R3_Q1="N" lub R3_Q2="Y" Q1 – Czy części A i B orientują się samoczynnie poprzez ich konstrukcję? Q2 – Czy po zorientowaniu części A i B ich położenie może ulec zmianie?			X					
R4_Q1="Y" i R4_Q2="N" Q1 – Czy części A i B montowane są w innym kierunku niż „od góry”? Q2 – Czy po zmianie bazy możliwy jest montaż „od góry” bez zmiany oprzyrządowania?				X				
R5_Q1="Y" lub R5_Q2="Y" lub R1_Q3="Y" Q1 – Czy części dołączaną B trudno uchwycić? Q2 – Czy część dołączana B jest zbyt elastyczna/delikatna podczas operowania nią? Q3 – Czy część dołączana podczas przechowywania może się zaplątać/zakleszczyć?					X			
R6_Q1="N" i R6_Q2="Y" Q1 – Czy część dołączana B jest symetryczna? Q2 – Czy niesymetryczność części dołączanej utrudnia jej orientowanie?						X		
R7_Q1="N" Q1 – Czy przy wykonywaniu połączenia dostęp wizualny jest zapewniony?							X	
R8_Q1="Y" lub R8_Q2="Y" Q1 – Czy zamiast części dołączanej B wykorzystać można istniejący komponent? Q2 – Czy część ta może być wytworzona w istniejącym parku maszynowym przedsiębiorstwa?								X

Rys. 2. Reguły przydzielania zasad DfA
Fig. 2. Rules of selection of DfA principles

projektowanych węzłów konstrukcyjnych [6, 10]. Podstawowe etapy tej analizy przedstawiono na rys. 1.

Pierwszym etapem analizy złożoności jest zapis wszystkich możliwych połączeń pomiędzy częściami składowymi analizowanego wyrobu w macierzy zależności (M_d). Macierz ta ma rozmiar $n \times n$, gdzie n jest liczbą części składowych wyrobu [7, 10]. Wiersze i kolumny indeksowane są identyfikatorami części. Każde możliwe połączenie dwóch części zapisywane jest znakiem (x) w komórce macierzy odzwierciedlającej wiersz i kolumnę reprezentującą odpowiednie części wyrobu. Przy założeniu, że jeżeli część A można dołączyć do części B i odwrotnie to macierz jest wypełniona symetrycznie. Symetryczność macierzy jest istotną cechą zapewnienia poprawnej analizy wszystkich zdefiniowanych połączeń analizowanego wyrobu.

Kolejnym krokiem w analizie złożoności jest identyfikacja potencjalnej możliwości zmniejszenia liczby części (np. przez ich integrację) oraz przyporządkowanie właściwych reguł DfA do projektowanych węzłów (połączeń dwóch części) konstrukcyjnych. W omawianym podejściu zdefiniowano 8 reguł DfA dotyczących: integracji części (R1 – reguła 1), stosowania zasady Poka-Yoke (R2), wzajemnego samopozycjonowania łączonych części (R3), kierunku procesu montażu (R4), odpowiedniego ukształtowania części (R5), symetryczności części (R6), wizualnego dostępu do połączenia podczas montażu (R7) oraz standaryzacji (R8). Reguły przydzielane są do poszczególnych połączeń na podstawie odpowiedzi na odpowiednio sformułowane pytania. Pytania oraz zasady przydziału reguł przedstawiono na rys. 2.

Potencjalne możliwości integracji części oraz przydział reguły R_1 do konkretnej pary łączonych części jest identyfikowana w oparciu o trzy pytania:

- czy części A i B muszą wykonywać ruch względem siebie? (R1_Q1),
 - czy części A i B muszą być wykonane z innego materiału? (R1_Q2),
 - czy części A i B muszą być odseparowane? (R1_Q3).
- Odseparowanie części występuje na ogół wtedy, kiedy części współpracujące ze sobą muszą być

demontowalne ze względu na warunki eksploatacji, izolowane względem siebie ze względu na przenikanie temperatury, spełnianie dodatkowych funkcji itd.

Jeżeli odpowiedzi na trzy pytania (R1_Q1, R1_Q2, R1_Q3) wskazują na „nie”, „nie” i „nie”, wówczas teoretycznie części A i B można zespolić i przydzielana jest im reguła R1 projektowania dla montażu. Jeżeli odpowiedzi na trzy pierwsze pytania są inne niż „nie”/„nie”/„nie”, wówczas część dołączana jest tzw. częścią krytyczną, której nie można scalać z częścią A.

Kolejnym elementem analizy złożoności jest wyznaczenie wskaźnika złożoności wyrobu. Wskaźnik ten (ang. Complexity index – C_i), obliczany jest jako iloraz liczby części krytycznych i całkowitej liczby części wyrobu. Krytyczne części ustala się w oparciu o wcześniej opisane, wnioskowanie dotyczące odpowiedzi na pytania Q1 do Q3. Wzór do wyliczenia wskaźnika złożoności wyrobu przedstawiono poniżej.

$$C_i = \frac{n}{N} 100\%, \text{ gdzie} \quad (1)$$

n – liczba części krytycznych,

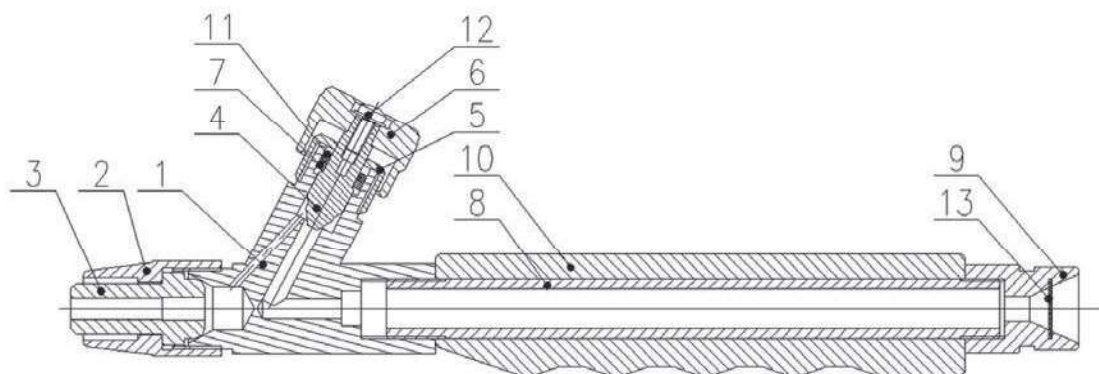
N – całkowita liczba części.

Przykład zastosowania analizy złożoności

Proponowane podejście do analizy złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu zobrazowano na przykładzie palnika gazowego przedstawionego na rys. 3. Palnik ten złożony jest z 13 części składowych. Zdefiniowano 36 relacji styczności pomiędzy jego częściami składowymi i przedstawiono je w macierzy zależności – tab. 1.

Na podstawie odpowiedzi na trzy pierwsze pytania (wg reguł przedstawionych na rys. 2) wyznaczono części krytyczne. Są nimi: korpus (1), tuleja gwintowana (2), tuleja łącząca (3), zawór (4), o-ring (11). Pozostałe części nie są krytyczne. Wskaźnik złożoności dla rozważanego przypadku wynosi 38,46%.

$$C_i = \frac{5}{13} 100\% = 38,46\%$$



Rys. 3. Konstrukcja palnika gazowego
Fig. 3. Gas burner structure

Tabela 1. Macierz zależności połączeń części składowych palnika gazowego
Table 1. Dependency matrix of the gas burner construction structure

		Korpus (1)	Tuleja g. (2)	Tuleja ł. (3)	Zawór (4)	Nakrętka (5)	Pokrętło (6)	Pierścień (7)	Łącznik (8)	Końcówka (9)	Rękojeść (10)	O-ring (11)	Śruba (12)	Siateczka (13)
Nazwa części		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Korpus (1)	1		x	x	x	x			x		x	x		
Tuleja g. (2)	2	x		x										
Tuleja ł. (3)	3	x	x											
Zawór (4)	4	x					x	x				x	x	
Nakrętka (5)	5	x												
Pokrętło (6)	6				x								x	
Pierścień (7)	7				x							x		
Łącznik (8)	8	x								x	x			
Końcówka (9)	9								x		x			x
Rękojeść (10)	10	x							x	x				
O-ring (11)	11	x			x			x						
Śruba (12)	12				x		x							
Siateczka (13)	13									x				

W kolejnym kroku na podstawie analizy odpowiednio przydzielonych reguł DfA do poszczególnych par połączeniowych zaproponowano zespolenie dwóch części, tj. zawór (4) i pierścień (7) – rys. 4.



Rys. 4. Integracja zaworu (4) z pierścieniem (7)
Fig. 4. Integration of the valve (4) and the ring (7)

Ponadto, na podstawie odpowiedzi na pytanie 4, dotyczącego potencjalnej możliwości błędnego połączenia dwóch części zdecydowano się na zmiany konstrukcyjne w elementach: korpus (1), łącznik (8), końcówka (9) oraz rękojeść (10). Łącznik rękojeści w pierwotnym opracowaniu na obu końcówkach ma gwint zewnętrzny o różnych długościach. Daje to możliwość niepoprawnego montażu. Proponowane zmiany dotyczą zróżnicowania gwintów po obu stronach łącznika na wewnętrzny z jednej i zewnętrzny z drugiej jego strony. Wyeliminowany zostanie przez to niepoprawny montaż łącznika do korpusu.

Zmiana w konstrukcji łącznika wiąże się z koniecznością przeprojektowania końcówki łącznika (9). Końcówkę tę przeprojektowano celem dostosowania jej do zmienionego łącznika rękojeści, tzn. gwint wewnętrzny zmieniono na zewnętrzny. Ostatnią proponowaną zmianą jest dostosowanie konstrukcji rękojeści tak aby uniemożliwić odwrotny jej montaż na łączniku rękojeści

między korpusem a końcówką łącznika. Proponowane zmiany dotyczą zróżnicowania zakończeń rękojeści, aby jednoznacznie można było identyfikować strony poprawnego montażu. Zaprojektowana rękojeść od strony korpusu i łącznika konstrukcyjnie nie różni się i z tego względu istnieje możliwość błędnego montażu ze względu na spełnianą funkcję rękojeści. Rękojeść przy błędnym montażu byłaby zamontowana odwrotnie i nie byłaby dostosowana do ergonomii ręki użytkownika. Aby wyeliminować możliwość niepoprawnego montażu przeprojektowano rękojeść różnicując jej ukształtowanie na obu zakończeniach oraz dostosowując jej konstrukcję z jednej strony do korpusu, z drugiej do łącznika (9). Ponadto, zróżnicowanie zakończeń rękojeści pozwoli na eliminację niepoprawności jej montażu. Zmiany konstrukcyjne w poszczególnych częściach przedstawiono w tab. 2, w której część przed zmianami przedstawiono z lewej strony.

Na skutek wprowadzonych zmian konstrukcyjnych poprawie uległ wskaźnik złożoności (C_c) z początkowej wartości 38,46% do 41,66% w ostatecznej konfiguracji oraz wyeliminowano możliwość błędnego montażu części składowych analizowanego palnika gazowego.

Podsumowanie i wnioski

Efektywne projektowanie wyrobów spełniających oczekiwania klientów (z reguły odpowiednia jakość, cena i niezawodność) oraz wymagania związane z ich cyklem życia (wytwarzanie, montaż, eksploatacja, recykling i inne) stanowi duże wyzwanie. Celem dostosowania procesu projektowo-konstrukcyjnego do tych wymogów, w nurcie inżynierii współbieżnej, opracowano wiele

Tabela 2. Zestawienie zmian konstrukcyjnych w wybranych częściach palnika gazowego
 Table 2. Structure changes in the selected components of the gas burner

Zmiany konstrukcyjne części – korpus (1)	Zmiany konstrukcyjne części – końcówka (9)
	
Zmiany konstrukcyjne części – łącznik (8)	Zmiany konstrukcyjne części – rękojeść (10)
	

podejść ukierunkowanych na te wymogi. Jednym z nich jest projektowanie dla montażu. W artykule przedstawiono propozycję analizy złożoności konstrukcji projektowanego wyrobu z uwzględnieniem zasad DfA. Na podstawie przykładowego zastosowania proponowanego podejścia wykazano celowość przeprowadzania tego typu analiz, zwłaszcza w początkowych, tj. koncepcyjnych fazach projektowania wyrobów. Na podstawie przeprowadzonych wielu analiz sformułowano następujące wnioski:

- analiza złożoności umożliwia uproszczenie konstrukcji wyrobu i dostosowanie jej części składowych do łatwego i szybkiego montażu,
- analiza złożoności umożliwia przydzielenie odpowiednich reguł DfA do ich zastosowania przy projektowaniu węzłów konstrukcyjnych wyrobu,
- przez wyznaczenie wskaźnika złożoności uzyskuje się możliwość analizowania i wybrania najkorzystniejszej spośród wielu różnych konstrukcji wyrobu.

LITERATURA

- [1] Andreasen M., S. Kähler, T. Lund. 1983. "Design for assembly". New York: Springer-Verlag.
- [2] Booker J.D., M. Raines, K.G. Swift. 2001. "Designing capable and reliable products". Butterworth-Heinemann.
- [3] Boothroyd G., P. Dewhurst, A. Knight Winston. 2002. "Product Design for Manufacture and Assembly, revised and expanded". CRC Press, 2002

[4] Bralla J.G. 1997. "Design for manufacturability handbook".

[5] Eder W.E., S. Hosnedl. 2010. "Introduction to design engineering: systematic creativity and management". CRC Press.

[6] Hosnedl S., M. Kopecky, M. Sasiadek. 2014. „Rationalising the use of design for assembly as DfX knowledge to increase competitiveness of designed technical products”. 55th International Conference of Machine Design Departments ICMD. Beroun, Czechy, Prague: Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering: 329–334.

[7] Kielec R., M. Sasiadek. 2014. Macierzowe planowanie procesów produkcyjnych w inżynierii współbieżnej”. Oficyna Wydawnicza Uniwersytetu Zielonogórskiego.

[8] Lotter B. 2013. "Manufacturing assembly handbook". Butterworth-Heinemann.

[9] Redford A., J. Chal. 1994. "Design for Assembly: Principles and Practice".

[10] Sasiadek M. 2015. "Planning and analysis of mechanical assembly sequences in design engineering—Part I: The Method". Tehnicki vjesnik 22.2: 337–342.

dr hab. inż. Michał Sasiadek, prof. UZ – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: m.sasiadek@iizp.uz.zgora.pl

dr inż. Roman Kielec – Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Zielonogórskiego, ul. Prof. Szafrana 4, 65-001 Zielona Góra, e-mail: r.kielec@iizp.uz.zgora.pl